

dinového systému jsou nedegenerované?

- 4.11 Excitovaná molekula, která se nachází na rotační podhladině s energií 1 meV, je v systému v termodynamické rovnováze při teplotě 300 K. Vypočtete poměr pravděpodobnosti stimulované a spontánní emise. Jaký je tento poměr pro excitovaný atom na úrovni s energií 4 eV?
- 4.12 Vyšetřete detailní průběh spektrální hustoty energie pro teploty 1000 a 10000 K a graficky znázorněte.
- 4.13 Vypočtete plošnou hustotu zářivého toku tělesa ohřátého do červeného žáru.

## Kapitola 5

### Detekce optického záření

Detekce záření je zjišťování přítomnosti optického záření v daném místě a v daném čase. V elektromagnetickém poli radiových kmitočtů se na přítomnost elektromagnetického pole usuzuje z účinků elektrického pole elektromagnetické vlny na volné náboje (nosiče proudu ve vodivé anténě). Je-li frekvence vlny stejná jako rezonanční frekvence obvodu připojeného k anténě, přelévá se energie elektromagnetické vlny do kmitavého elektrického obvodu, obsahujícího indukčnosti a kondenzátory. Velikosti intenzity elektrického pole elektromagnetické vlny odpovídá např. napětí na kondenzátoru kmitavého obvodu. Anténa zajišťující účinné odsátí energie elektromagnetického pole a její přeměnu na energii elektrickou musí mít vhodný rozměr, bývá rovný polovině vlnové délky detekovaného záření.

V případě, že bychom chtěli tuto metodu tzv. *přímé detekce* extrapolovat pro optické vlny, pak by příslušná anténa měla mít rozměry zlomků mikrometrů a rezonanční obvod by měl být naladěn na frekvenci řádově  $10^{15}$  Hz. V našem makrosvětě pomocí běžných elektronických prvků to však není realizovatelné.

Detektory optického záření jsou *detektory nepřímé*. Jsou založeny zpravidla na absorpci záření, tj. předání energie kvantovým soustavám, po které následuje přeměna vnitřní energie kvantové soustavy v jinou formu energie makroskopického systému (v němž se kvantová soustava nachází), nejčastěji

energii tepelnou, elektrickou a chemickou. Optická detekce je tedy založena na pozorování změn tepelného elektrického nebo chemického stavu látky, změn, které jsou následující po absorpci optického záření.

## 5.1 Základní parametry optických detektorů

Základními charakteristikami optických detektorů jsou *detektivita*, *konverzní účinnost*, *časová odezva* a *spektrální charakteristika*.

### 5.1.1 Detektivita

Detektivita je parametr detektoru, který charakterizuje schopnost detektoru rozpoznat informaci přenášenou zářením. Vyplyvá z prahové hodnoty detekovatelného výkonu optického záření.

Minimální (prahový) výkon optického záření  $P_{min}$ , postačující k tomu, aby dopadající signál nezanikl v šumech, bývá úměrný druhé odmocnině ze šířky frekvenčního pásma  $\Delta f$  detekčního zařízení:

$$P_{min} = \frac{\sqrt{\Delta f}}{D}, \quad (5.1)$$

kde součinitel  $D$  je *detektivita*. Takže fyzikální rozměr detektivity je tedy  $W^{-1}Hz^{1/2}$ . U většiny plošných detektorů je minimální detekovatelný výkon  $P_{min}$  úměrný také druhé odmocnině s plošného obsahu  $S$  fotocitlivé plochy detektoru:

$$P_{min} = \frac{\sqrt{\Delta f \Delta S}}{D^*}, \quad (5.2)$$

takže se zavádí tzv. *normovaná detektivita*  $D^*$ , která má fyzikální rozměr  $W^{-1}mHz^{1/2}$

### 5.1.2 Konverzní účinnost

Konverzní účinnost je obecnou charakteristikou procesů (systémů nebo zařízení), při nichž dochází k přenosu energie nebo změnám formy energie.

Konverzní účinnost bývá definována poměrem výsledné (využité energie) k energii do procesu vstupující.

U optických detektorů je celková *konverzní účinnost* dána poměrem energie *tepelné* (u tepelných detektorů), *elektrické* (u fotoelektrických detektorů), resp. *chemické* (u fotochemických detektorů) vydělené ve fotodetektoru k energii optického záření dopadajícího na detektor.

Je-li detektor založen na fotoelektrickém jevu, zavádí se namísto konverzní účinnosti tzv. *kvantová účinnost*, definovaná poměrem počtu uvolněných fotoelektronů k počtu fotonů záření dopadajících na fotokatodu.

### 5.1.3 Časová odezva

Časová odezva detektoru je časový interval, za který se podstatně změnil výstupní signál detektoru, jestliže se na počátku změnila skokem intenzita signálu dopadajícího na detektor. Bývá zaváděna přesnější definice, která rozlišuje dobu nárůstu a dobu poklesu signálu. Při zapnutí optického signálu se jedná o dobu nárůstu, která je rovna době, za kterou výstupní signál detektoru dosáhne  $(1 - 1/e)$  násobku maximální hodnoty. Při vypnutí optického záření je doba poklesu dána intervalem, za který výstupní signál poklesne na  $1/e$  výchozí maximální hodnoty. Časová odezva závisí na fyzikálních (chemických) procesech, které v detektoru probíhají.

### 5.1.4 Spektrální charakteristika

Spektrální charakteristika je závislost výstupní veličiny detektoru optického záření na frekvenci (nebo vlnové délce) dopadajícího optického záření. Je-li spektrální charakteristika konstantní ve velkém intervalu optických frekvencí, nazýváme *detektor neselektivním*. V opačném případě jde o *detektor spektrálně selektivní*.

Tabulka 5.1: Tepelné detektory

Detektor	Princip činnosti
kalorimetr	teplo
termočlánek	termoelektrické napětí
bolometr	změna elektrické vodivosti
termistor	změna elektrické vodivosti
pyroelektrický detektor	změna polarizace
pyromagnetický detektor	změna permeability
Golayova cela	tepelná roztažnost plynu
evaporograf	kondenzované páry na tenké membráně
tekuté krystaly	změna optických vlastností
termionický detektor	změna rychlosti emise z katody

## 5.2 Tepelné detektory

Tepelné detektory optického záření jsou založeny na přeměně absorbované energie optického záření na energii tepelnou. Změny teploty čidla (v důsledku absorpce záření) mohou být doprovázeny změnami dalších parametrů látky jako jsou změny tlaku plynu, elektrické vodivosti, elektrické polarizace apod. Tepelné detektory bývají *neselektivní* v pásmu vlnových délek záření 0,2  $\mu\text{m}$  až 50  $\mu\text{m}$ . Nejlepší tepelné detektory vykazují detektivitu  $D = 10^{10}$  až  $10^{11} \text{ W}^{-1}\text{Hz}^{1/2}$  a časovou odezvu  $10^{-1}$  až  $10^{-3}$  s. Supravodivé polovodičové bolometry (při pracovní teplotě 3 až 15 K) mají detektivitu až  $10^{12} \text{ W}^{-1}\text{Hz}^{1/2}$  a časovou odezvu  $10^{-4}$  s.

Tepelné detektory se uplatňují zejména pro detekci infračerveného záření. V tabulce 5.1 jsou shrnuty používané tepelné detektory a principy jejich činnosti.

### 5.2.1 Kalorimetr

Kalorimetr je přístroj pro absolutní měření množství tepelné energie, která vznikne, nebo je prostředím kalorimetru předána při různých fyzikálních, chemických nebo biologických procesech. Kalorimetr je zařízení univerzální, avšak pro měření, obvykle malých energií přenášovaných optickým zářením se jako optický detektor nepoužívá. Slouží však v metrologických optických laboratořích ke kalibraci detektorů jiných typů. Jeho časová odezva bývá velmi dlouhá, zpravidla několik sekund.

### 5.2.2 Termočlánek

Termočlánek je čidlem teploty, vzniká spojením dvou rozdílných elektricky vodivých materiálů. Měřítkem teploty je velikost termoelektrického napětí, které vzniká při zahřívání (resp. ochlazování) spoje. Termočláanky se zhotovují z kovů a jejich slitin, méně často z polovodičů.

Kovové termočláanky jsou v praxi jsou velmi rozšířené pro jejich spolehlivost a vysokou mechanickou odolnost. Používají se pro měření teplot od 1 K do 2800 K. Přesnost měření standardních termočláanků je 1 K, s použitím můstkového zapojení lze dosáhnout přesnosti 0,01 K. *Polovodičové termočláanky* jsou podstatně citlivější než kovové, ale jsou nestabilní, mají horší mechanické vlastnosti a technologie výroby je poměrně složitá.

Zvláštní *kovové termočláanky* s časovou odezvou 30 ns se zhotovují technologií vakuového napařování (např. vizmutu a antimonu) na safírovou podložku. Termočláanky bývají součástí planárních elektronických obvodů. Termočláanků může být v jednom obvodu různý počet a mohou mít různé geometrické uspořádání.

### 5.2.3 Bolometr

Bolometr pracuje na principu měření změny odporu čidla ohříváného dopadajícím zářením. Relativní změna odporu

$$\frac{\Delta R}{R} = \alpha_T \Delta T \quad (5.3)$$

je určena teplotním součinitelem  $\alpha_T$ , který závisí na použitém materiálu čidla a pracovní teplotě. Nabývá hodnot 0.5 až 5000 K<sup>-1</sup>. Při konstrukci bolometru se používá dvou stejných čidel v můstkovém zapojení. Druhé čidlo kompenzuje změny teploty prostředí popř. vliv radiačního šumu.

Čidla bolometrů se zhotovují buď z kovů nebo z polovodičů. *Kovové bolometry* bývají v podobě tenkých vrstev (0,1 až 1 μm) niklu, zlata nebo vizmutu. Povrchy bývají začerněny, aby se dosáhlo vysoké absorpční schopnosti. Teplotní součinitel  $\alpha_T$  kovů při pokojové teplotě je malý. *Polovodičové bolometry* z germania, antimonu nebo oxidů hořčíku, niklu, kobaltu apod. mají při pokojové teplotě součinitel  $\alpha_T = 4.2 \text{ K}^{-1}$ . Pro dosažení podstatně větších citlivostí se používají kovové bolometry Sn, Ta, Nb při teplotě 3 až 15 K, kdy lze dosáhnout součinitele  $\alpha_T = 5000 \text{ K}^{-1}$ .

Jiná metoda zvyšování citlivosti bolometru souvisí s modifikací konstrukčního uspořádání. Čidlo tzv. *immerzního bolometru* bývá doplněno čočkou s velmi malou ohniskovou vzdáleností. Dopadající záření je fokusováno na velmi malou plochu, což umožňuje zmenšení rozměrů čidla a zrychlení časové odezvy. Nejcitlivější a současně nejrychlejší jsou *supravodivé bolometry* s časovou odezvou cca 100 ns.

### 5.2.4 Termistor

Termistor je *nelineární*, teplotou řízený, elektrický *dvojčl* na bázi oxidů kovů. Je charakteristický především tím, že jeho odpor exponenciálně klesá se stoupající teplotou. Teplotní součinitel odporu při 300 K je  $-0.03 \text{ K}^{-1}$ . Perlickové termistory v můstkovém zapojení se používají jako čidla pro měření malých výkonů optického záření v bolometrech nebo kalorimetrech.

### 5.2.5 Pyroelektrický detektor

Pyroelektrický detektor je tepelný detektor založený na *pyroelektrickém jevu*, tj. na vzniku *náboje na povrchu* některých dielektrických materiálů při jejich ohřívání nebo ochlazování. Jeden konec pyroelektrického materiálu se při ohřátí nabije kladně, druhý záporně. Vznik náboje je projevem změny *polarizace* (makroskopického dipólového momentu) *dielektrika* (krystalu). Pro konstrukci pyroelektrických detektorů záření se používají materiály TGS (triglycinesulgát), LT (lithium-tantalát), SBN (stroncium-barium-niobát), keramické materiály ZT (zirkon-titan) a polymerové filmy typu PVF (polyvinylfluorid)

Pyroelektrické detektory mohou být velmi rychlé. Jejich časová odezva je až 30 ps, jsou mechanicky odolné a stabilní, pracují při pokojové teplotě. Největší uplatnění nacházejí jako nechlazené detektory infračerveného záření. Jsou umísťovány v bezpečnostních systémech jako všesměrové detektory ohně nebo pohybu předmětů a osob ve střežených prostorách apod.

## 5.3 Fotoelektrické detektory

Fotoelektrické detektory jsou založeny na přeměně energie optického záření na elektrickou energii. Jsou založeny buď na *fotovodivostních změnách*, *fotodielektrickém jevu* (tj. změně permitivity excitací atomů), nebo na vnitřním, resp. vnějším *fotoelektrickém jevu*.

*Vnější* fotoelektrický jev je emise elektronů z pevných látek a kapalin do vakua nebo jiného prostředí vyvolávaná absorpcí záření. Uskutečňuje se při kvantových přechodech v pevné látce. Počet uvolňovaných elektronů je dán počtem absorbovaných kvant elektromagnetického záření – fotonů. Kinetická energie uvolňovaných elektronů je dána frekvencí záření a nezávisí na intenzitě záření. Pro každý materiál existuje jistá minimální (prahová) frekvence, odpovídající vazbové energii, při které ještě nastává vnější fotoelektrický jev.

*Vnitřní fotoelektrický jev* je změna populace elektronových energetických hladin v pevné látce, ke které dochází v důsledku absorpce optického záření a která znamená přírůstek počtu volných nosičů.

### 5.3.1 Fotovodivostní detektor

*Fotovodivost* je zvětšení vodivosti materiálu účinkem optického záření, tedy v důsledku vnitřního fotoelektrického jevu. Fotovodivost se pozoruje u všech polovodičů. Je možné ji dělit na tři mechanismy a to:

1. *vlastní vodivost* způsobenou kvantovým přechodem z valenčního pásu do vodivostního pásu v pevné látce, spojeným s absorpcí fotonu. Elementární kvantum energie  $hf$  (foton) musí být větší než šířka zakázaného pásu  $\Delta E$ .
2. *nevlastní fotovodivost* způsobenou přechodem nosiče náboje z příměsového pásu, který leží uvnitř zakázaného pásu materiálu. Může to být hladina donoru blíže k vodivostnímu pásu, nebo akceptoru, která je blíže valenčnímu pásu. Musí být splněna rezonanční podmínka pro frekvenci kvantového přechodu a frekvenci dopadajícího záření.
3. fotovodivost způsobená *změnou pohyblivosti* elektronů ve vodivostním pásu, tj. kvantovými přechody elektronů pevné látky uvnitř vodivostního pásu. Tento mechanismus se uplatňuje při absorpci v dlouhovlnné části optického spektra.

Elektrický proud protékající elektrickým obvodem, jehož je fotovodivostní detektor součástí, závisí na absorbovaném záření. Fotovodivostní detektory na principu vlastní fotovodivosti (fotoodpory) se vyznačují velkou hodnotou součinitele absorpce a používají se pro detekci optického záření až do  $8\text{ }\mu\text{m}$ . Polovodičové detektory využívající nevlastní vodivosti jsou spektrálně selektivní v pásmu vlnových délek  $0,6$  až  $1,2\text{ }\mu\text{m}$ . Na vnitřním fotoelektrickém jevu jsou založeny i speciální detektory citlivé pro infračervené záření až do  $30\text{ }\mu\text{m}$ . Detektivita se pohybuje v rozmezí  $10^{12}$  až  $10^{15}\text{ W}^{-1}\text{Hz}^{1/2}$ .

### 5.3.2 Fotokatoda

Fotokatoda je základem mnoha optických detekčních systémů (např. vakuové fotodiody, fotonásobiče, zesilovače a převaděče optických signálů). Je to selektivní detektor založený na *vnějším fotoelektrickém jevu*. Fotokatomy bývají tvořeny tenkými vrstvami materiálu na průzračné podložce. Dopadající záření prostupuje podložkou a uvolňuje fotoelektron z katody do vakua. Spektrální citlivost fotokatod je dána vlastnostmi použitého materiálu, přičemž dlouhovlnná mez je dána prahovou vlnovou délkou pro vnější fotoelektrický jev.

### 5.3.3 Vakuová fotodioda

Vakuová fotodioda se skládá z *fotokatody* a *anody* umístěných ve vakuu. Elektrony uvolněné zářením z fotokatody jsou urychlovány přiloženým napětím mezi katodu a anodu. Elektrický proud je úměrný intenzitě optického záření, které na fotokatodu dopadá. Časová odezva vakuové fotodiody bývá  $0,1\text{ ns}$ . Spolu s rozvojem polovodičových technologií byly vakuové fotodiody nahrazeny polovodičovými fotodiodami.

### 5.3.4 Polovodičová fotodioda

Polovodičová fotodioda je detektor využívající *vnitřní fotoelektrický jev* a jednosměrné vodivosti na přechodu PN polovodičové diody. Působením optického záření vznikají v PN přechodu volné nosiče. Proud v závěrném směru je ve velkém dynamickém rozsahu úměrný intenzitě dopadajícího záření a nezávisí na velikosti vnějšího přiloženého napětí. Spektrální citlivost je dána použitým polovodičovým materiálem, popř. i pracovní teplotou. Časová odezva vyplývá z doby průletu volného nosiče přechodem PN. Závisí na konstrukci a technologii výroby polovodiče, na vlnové délce záření a na vnějším elektronickém obvodu. Časová odezva nejrychlejších polovodičových fotodiod je několik pikosekund.

Polovodičové fotodiody využívají přechodu PN *v polovodiči* nebo při *spojení dvou* různých polovodičových materiálů. Podobné vlastnosti jako přechod PN u polovodičů má i přechod *kov-polovodič*, který se využívá u Schottkiových fotodiod. Mikroelektronické technologie umožňují zhotovení většího počtu polovodičových fotodiod v jednom prvku a v různém geometrickém uspořádání a s dalšími elektronickými obvody v témže prvku. Do této skupiny patří tzv. *prvky s nábojovou vazbou* (CCD — Charge Couple Devices).

### 5.3.5 Lavinový detektor

Lavinový detektor je polovodičová fotodioda, která využívá ionizačních (lavinových) procesů v polovodiči k zesílení fotoproudu. Lavinové detektory mají velkou detektivitu a krátkou časovou odezvu ( $10^{-10}$  s až  $10^{-11}$  s). Používají se k měření slabých a krátkých optických impulsů.

## 5.4 Fotočlánky

Fotočlánek je zdroj *fotoelektrického napětí*. Vznik fotoelektrického napětí v různých materiálech a soustavách může mít různé příčiny.

1. Důsledkem nehomogenního ozáření krystalu a rozdílných difúzních rychlostí kladných a záporných nosičů proudu vzniká tzv. *difúzní elektromotorické napětí*, které je poměrně slabé.
2. *Diodové fotoelektrické napětí* vzniká především na přechodech kov-polovodič, na přechodech PN a nehomogenně legovaných polovodičích. Fotoelektrické napětí na PN přechodech je základem slunečních článků.
3. Fotoelektrické napětí důsledkem *fotopiezoelektrického jevu* (za přítomnosti tlaku), *fotomagnetoelektrického jevu* (za přítomnosti magnetického pole).
4. Tlakem dopadajícího optického záření jako přímé předávání hybnosti záření elektronům v polovodičích. Detektory založené na tomto principu mají velmi krátkou časovou odezvu.

## 5.5 Fotochemické detektory

U fotochemických detektorů se absorbovaná energie optického záření spotřebuje na iniciaci chemické reakce.

### 5.5.1 Fotografická emulze

Fotografická emulze je materiál sestávající z želatiny jako nosného prostředí, ve kterém jsou rozptýleny mikroskopické nebo submikroskopické krystalky halogenidu stříbra, zprav. bromidu stříbrného. V důsledku absorpce záření se *uvolňuje elektron* ze záporného iontu bromu. Elektron „putuje“ krystalem a může být zachycen kladným iontem stříbra. Vzniklý atom stříbra představuje ale poruchu v krystalografické mříži. Má dobu života asi 1 s a opět se rozpadá. Spojením dvou atomů stříbra v molekulu vzniká již stabilní útvar, ale teprve shluky tří a více molekul vedou k vytvoření tzv. *latentního obrazu*. Vlastní citlivost emulze, daná absorpčním spektrem halogenidu stříbra je omezena na krátkovlnnou část viditelného spektra a ultrafialovou oblast.

## 5.6 Lidské oko

Nejstarším a poměrně citlivým detektorem optického záření je *lidské oko*. Je to detektor spektrálně selektivní v pásmu vlnových délek 400 až 800 nm s maximální citlivostí pro vlnovou délku 555 nm.

Lidské oko má dva typy *receptorů*: *tyčinky* (průměr 2  $\mu\text{m}$ , počet  $1,3 \cdot 10^8$ ) a *čípky* (průměr 4  $\mu\text{m}$ , počet  $7 \cdot 10^6$ ). Porovnání funkcí a vlastností čípků a tyčinek plyne z tab. 5.2

Citlivost tyčinek a čípků není konstantní. *Adaptací oka* označujeme automatické přizpůsobení oka vstupní intenzitě záření v rozsahu  $1 : 10^9$ . Adaptace se uskutečňuje dvěma způsoby, a to buď rychlou adaptací (1:16) — změnou průměru otvoru duhovky (pupily) od 2 do 8 mm, nebo pomalou adaptací změnou procesů v sítnici (30 min.).

Tabulka 5.2: Receptory lidského oka

## Čípky Tyčinky

převážně v oblasti žluté skvrny	větší hustota mimo žlutou skvrnu
malé zorné pole	velké zorné pole
velká ostrost vidění	nižší ostrost vidění
barevné vidění	šedé (nebarevné) vidění
nižší citlivost	vyšší citlivost

Příklady ke kapitole 5

- 5.2 Vypočtěte proud detektoru vyvolaný ve fotodiodě svazkem z *He-Ne* laseru s výkonem  $1 \mu\text{W}$  za předpokladu, že každé dva fotony vyvolají vznik jednoho náboje. Jaký má být odpor zátěže, aby se napětí na něm rovnalo  $1 \text{ mV}$ ?
- 5.3 Vypočtěte proud detektoru vyvolaný svazkem *He-Ne* laseru s výkonem  $0,1 \text{ mW}$  ve fotonásobiči, který je tvořen fotokatodou, pěti dynodami a anodou. Předpokládejte, že fotokatoda má kvantovou účinnost  $10\%$ , každá dynoda emituje tři elektrony na jeden dopadající elektron. Na anodu dopadají všechny elektrony z poslední dynody.
- 5.5 Úhel divergence laserového svazku s výkonem  $1 \text{ W}$  umístěného na zemi se rovná  $2 \text{ mrad}$ . Jestliže útlum atmosféry představuje  $10 \text{ dBkm}^{-1}$ , vypočtěte, jaká je maximální přípustná vzdálenost mezi zdrojem a retranslátorem. Plocha detektoru retranslátoru je  $1 \text{ cm}^2$  a minimální spolehlivě detekovatelný signál  $1 \mu\text{W}$ .
- 5.7 Vypočtěte dopadající signál na detektoru vyvolávaný zářením *He-Ne* laseru s výkonem  $1 \text{ mW}$  a s úhlem divergence  $2 \text{ mrad}$ , vzdálenost laser — detektor  $10 \text{ km}$ , poloměr fotokatody  $1 \text{ cm}$ . Pro kvantovou účinnost fotokatody  $10\%$  vypočtěte vyvolaný proud fotodetektozem.

## Kapitola 6

## Klasické zdroje optického záření

Zdroje optického záření jsou zařízení nebo objekty, v nichž dochází k přeměně různých forem energie na energii elektromagnetického záření v pásmu optických frekvencí tj. s vlnovými délkami ve vakuu v pásmu desítek nanometrů až zlomků milimetrů.

Existují přirozené (přírodní) a umělé zdroje optického záření. K přirozeným zdrojům patří Slunce, hvězdy, atmosférické výboje a luminiscenční zdroje živočišného a rostlinného původu. Umělé zdroje je možné rozdělit do dvou skupin na klasické zdroje (nekoherentní) a nové koherentní zdroje reprezentované především lasery.

*Nekoherentní* zdroje bývají tvořeny velkým množstvím elementárních zářičů (atomů, iontů, molekul apod.), které vysílají záření v procesech spontánní emise, navzájem nezávisle. Frekvence záření je dána frekvencemi kvantových přechodů soustav, ze kterých je látka složena. Mezi fázemi jednotlivých vysílaných vln neexistuje žádný vztah. Výsledné elektromagnetické pole od mnoha zářičů má charakter náhodného signálu – šumu.

Tyto klasické zdroje je možné rozdělit na tepelné (termodynamicky rovnovážné) a luminiscenční (nerovnovážné). K tepelným zdrojům patří každé dostatečně ohřáté těleso (např. plamen, žárovka), idealizovaným zdrojem záření je tzv. černé těleso. Luminiscenční zdroje jsou založeny na buzení luminiscence plynů nebo pevných látek, uskutečňované elektrickým výbojem v